



全国高等职业教育技能型紧缺人才培养培训推荐教材

QUANGUO GAODENG ZHIYE JIAOYU JINENGXING JINQUE RENCAI PEIYANG PEIXUN TUIJIAN JIAOCAI

建筑设备工程技术专业

流体与热工基础

LIUTI YU REGONG JICHU

本教材编审委员会组织编写

余 宁 主编



中国建筑工业出版社

全国高等职业教育技能型紧缺人才培养培训推荐教材

流体与热工基础

(建筑设备工程技术专业)

本教材编审委员会组织编写

余 宁 主编

刘春泽 主审

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

流体与热工基础/余宁主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2005
全国高等职业教育技能型紧缺人才培养培训推荐教材.
建筑设备工程技术专业
ISBN 7-112-07152-6

I. 流... II. 余... III. ①流体力学—高等学校:
技术学校—教材②热工学—高等学校: 技术学校—教材
IV. ①O35②TK122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 059282 号

全国高等职业教育技能型紧缺人才培养培训推荐教材

流体与热工基础

(建筑设备工程技术专业)

本教材编审委员会组织编写

余 宁 主编

刘春泽 主审

*

中国建筑工业出版社出版 (北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

北京蓝海印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 15 1/4 插页: 2 字数: 367 千字

2005 年 9 月第一版 2005 年 9 月第一次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 22.00 元

ISBN 7-112-07152-6

TU·6387 (13106)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

序

改革开放以来,我国建筑业蓬勃发展,已成为国民经济的支柱产业。随着城市化进程的加快、建筑领域的科技进步、市场竞争的日趋激烈,急需大批建筑技术人才。人才紧缺已成为制约建筑业全面协调可持续发展的严重障碍。

面对我国建筑业发展的新形势,为深入贯彻落实《中共中央、国务院关于进一步加强人才工作的决定》精神,2004年10月,教育部、建设部联合印发了《关于实施职业院校建设行业技能型紧缺人才培养培训工程的通知》,确定在建筑施工、建筑装饰、建筑设备和建筑智能化等四个专业领域实施技能型紧缺人才培养培训工程,全国有71所高等职业技术学院、94所中等职业学校、702个主要合作企业被列为示范性培养培训基地,通过构建校企合作培养培训人才的机制,优化教学与实训过程,探索新的办学模式。这项培养培训工程的实施,充分体现了教育部、建设部大力推进职业教育改革和发展的办学理念,有利于职业院校从建设行业人才市场的实际需要出发,以素质为基础,以能力为本位,以就业为导向,加快培养建设行业一线迫切需要的高技能人才。

为配合技能型紧缺人才培养培训工程的实施,满足教学急需,中国建筑工业出版社在跟踪“高等职业教育建设行业技能型紧缺人才培养培训指导方案”编审过程中,广泛征求有关专家对配套教材建设的意见,组织了一大批具有丰富实践经验和教学经验的专家和骨干教师,编写了高等职业教育技能型紧缺人才培养培训“建筑工程技术”、“建筑装饰工程技术”、“建筑设备工程技术”、“楼宇智能化工程技术”4个专业的系列教材。我们希望这4个专业的系列教材对有关院校实施技能型紧缺人才的培养培训具有一定的指导作用。同时,也希望各院校在实施技能型紧缺人才培养培训工作中,有何意见及建议及时反馈给我们。

建设部人事教育司

2005年5月30日

前 言

《流体与热工基础》是建筑设备类专业的主要理论技术基础课之一,是从事通风空调、供热采暖及锅炉设备管理和施工安装等高等专业技术人员必须掌握的基础知识。任务是通过本教材的学习,使其掌握流体力学的基本概念和流体静力学与动力学基本知识;熟悉流体沿程损失和局部损失的计算以及减少流动阻力的措施,并能进行简单管路的水力计算;掌握有关热力学基本定律、工质的状态参数及其变化规律等基础理论知识;掌握导热、对流、热辐射换热的基本定律以及稳定传热的基本计算,为学习专业知识奠定必要的热力分析与热工计算的理论基础和基本技能。

本教材是2004年11月初,根据全国高职高专教育土建类专业教学指导委员会建筑设备类专业指导分委员会,落实教育部和建设部提出的技能型紧缺人才培养培训指导方案所讨论确定的专业教育标准、专业培养方案和课程指导性教学大纲来编写的。

《流体与热工基础》计划教学64学时,共分5大单元21个课题。单元1流体力学的5个课题,主要讲述流体的主要物理性质,流体静力学基础与流体动力学基础,流体沿程损失和局部损失的计算,减少流动阻力的措施及简单管路的水力计算;单元2泵与风机的3个课题,主要讲述泵与风机的基本构造、工作原理、性能参数,泵与风机的正确选用,其他常用的泵与风机;单元3工程热力学的五个课题,主要介绍工程热力学的基本概念,理想气体的状态方程和基本热力过程,热力学第一、二定律,水蒸气、湿空气,喷管、扩压管、节流等;单元4传热学的5个课题,主要介绍传热的基本概念,稳定导热、对流换热、辐射换热、稳定传热的基本定律与基本计算分析以及传热的加强与削弱问题;单元5实验的3个课题,介绍了流体静力学实验、沿程及局部水头损失实验和空气参数的测定实验。

本教材在符合专业教育标准,专业培养方案和教学大纲中规定要求的知识点、能力点条件下,具有高等职业教育的特色。课题式讲解突出了专业的实用性与针对性,使得编写能删繁就简,突出专业需要,较快地切入主题。各课题在内容安排上既考虑相对的独立性,又考虑知识的先后照应关系;论述上考虑适当的深度,做到层次分明,重点突出,使知识易于学习掌握。所用名词、符号和计量单位符合技术标准规定。各单元课题前写有课题的知识点与教学目标,单元后有相应的实用案例、习题与思考题,能够帮助学生突出学习重点,加深内容理解,巩固知识,培养学生分析问题、解决问题的能力。

本教材由江苏广播电视大学建筑工程学院余宁副教授担任主编,沈阳建筑大学职业技术学院刘春泽教授担任主审。黑龙江建筑职业技术学院王宇清编写单元1、单元2,江苏广播电视大学建筑工程学院余宁编写第单元3、单元4,江苏广播电视大学实验中心桑海涛、周昕编写单元5。

限于编者水平,教材中难免有许多不妥或错误之处,恳请读者提出宝贵意见与指正。

目 录

单元 1 流体力学	1
课题 1 流体的基本概念	1
课题 2 流体静力学基础	6
课题 3 流体动力学基础	16
课题 4 流动阻力与能量损失	34
课题 5 管路的水力计算	46
思考题与习题	52
单元 2 泵与风机	58
课题 1 离心式泵与风机的基本知识	58
课题 2 离心式泵或风机的运行与调节	74
课题 3 其他常用的泵与风机	80
思考题与习题	85
单元 3 工程热力学	87
课题 1 基本概念和气态方程	87
课题 2 热力学第一定律和第二定律	94
课题 3 水蒸气	107
课题 4 湿空气	114
课题 5 喷管和节流	126
思考题与习题	129
单元 4 传热学	132
课题 1 概述	132
课题 2 稳定导热	134
课题 3 对流换热	145
课题 4 辐射换热	163
课题 5 传热过程与传热的增强与削弱	172
思考题与习题	183
单元 5 流体与热工的基本实验	186
课题 1 流体静力学实验	186
课题 2 沿程水头、局部水头损失实验	189
课题 3 常用空气状态参数的测量方法	195
附 录	204
主要参考文献	234

单元1 流体力学

知识点：流体的主要物理性质，流体静力学基础及流体动力学基础，流体沿程阻力损失和局部阻力损失的计算，简单管路的水力计算。

教学目标：使学生掌握流体的主要物理性质，流体静力学基础及流体动力学基础知识，流体沿程阻力损失和局部阻力损失的计算方法，以及简单管路的水力计算方法。

课题1 流体的基本概念

1.1 流体力学研究的对象、内容及其应用

流体力学研究流体静止和运动时的力学规律，及其在工程技术中的应用。它是力学学科的一个组成部分。

流体力学的研究对象是流体，流体包括液体和气体。流体力学主要讨论工程实际问题中流体的平衡和运动规律，属于工程流体力学的范畴。流体力学由两个基本部分组成：一是研究流体静止规律的流体静力学；二是研究流体运动规律的流体动力学。

从微观角度看，流体并不是一种连续分布的物质。但是，流体力学研究的是流体的宏观机械运动（无数分子总体的力学效果），因此，从宏观角度出发，认为流体是被其质点全部充满，无任何空隙存在的连续体。在流体力学中，把流体当作“连续介质”来研究，就可以把连续函数的概念引入到流体力学中来，利用数学分析来研究流体的运动规律。

流体力学是建筑设备技术专业、供热通风与空调工程和燃气工程等专业的一门重要的专业基础课程。供热、制冷、给水排水、空气调节、燃气输配、通风除尘等工程中，都是以流体作为工作介质，应用流体的物理特性、静止和运动规律，将流体有效地组织起来应用于这些技术工程之中。因此，学好流体力学，才能对专业范围内的流体力学现象做出科学的定性分析及精确的定量计算，正确地解决工程中所遇到的流体力学方面的测试、运行、管理与设计计算等问题。

1.2 流体的主要物理性质

流体在静止状态时不能承受剪切力，也不能承受拉力，当有剪切力和拉力作用于流体时，流体便产生连续的变形，也就是流体质点之间会产生相对运动。静止流体只能承受压力。流体区别于固体的基本特征是流体具有流动性，流动性使流体的运动具有下列特点：

第一，流体没有固定形状，它的形状是由约束它的边界形状所决定的。与流体接触的物体的形状和性质（也就是边界条件）对流体的运动有着直接的影响。

第二，流体的运动和流体的变形联系在一起，而流体的变形又是和它的物理性质有密切的关系，物理性质不同的流体，即使其边界条件相同也会产生不同的流动。

流体力学中所要探讨的运动规律，实质上就是要研究流体的物理性质和流动的边界条件对流体运动所产生的作用和影响。

流体的主要物理性质有：密度和重度，压缩性和膨胀性，黏滞性等。

1.2.1 密度和重度

流体和其他物体一样，具有质量和重量。

(1) 单位体积流体所具有的质量，称为质量密度，简称密度，用 ρ 表示。任意点上密度都相同的流体，称为匀质流体。匀质流体密度可表示为：

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1-1)$$

式中 ρ ——流体的密度， kg/m^3 ；

M ——流体的质量， kg ；

V ——质量为 M 的流体所占的体积， m^3 。

(2) 单位体积流体所具有的重力，称为重力密度，简称重度，用 γ 表示。

匀质流体的重度为：

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-2)$$

式中 γ ——流体的重度， N/m^3 ；

G ——流体的重力， N ；

V ——重量为 G 的流体体积， m^3 。

由于重量等于质量乘以重力加速度，即 $G = mg$ 。所以密度和重度有下列关系：

$$\gamma = \rho g \quad (1-3)$$

式中 g ——重力加速度，一般采用 $g = 9.81\text{m/s}^2$ 。

常见流体的密度和重度值见表 1-1。

常见流体密度、重度表

表 1-1

流体名称		密度 (kg/m^3)	重度 (N/m^3)	测定条件	
				温度 ($^{\circ}\text{C}$)	气压
液体	煤油	800 ~ 850	7848 ~ 8338	15	760mmHg
	纯乙醇	790	7745	15	
	水	1000	9807	4	
	水银	13590	133378	0	
气体	氮	1.2505	12.2647	0	760mmHg
	氧	1.4290	14.0185		
	空气	1.2920	12.6824		
	二氧化碳	1.9768	19.3924		

1.2.2 压缩性和膨胀性

在温度不变条件下，流体受压，体积减小，密度增大的性质，称为流体的压缩性。在压强不变条件下，流体受热，体积增大，密度减小的性质，称为流体的膨胀性。

(1) 液体的压缩性和膨胀性

液体的压缩性通常以压缩系数 β 表示，它表示压强每增加 1Pa 时，液体体积或密度的

相对变化率。即：

$$\beta = - \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta P} = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta \rho}{\Delta P} \tag{1-4}$$

式中 β ——流体的体积压缩系数， m^2/N ；

Δp ——流体压强的增加量，Pa；

V ——原有流体体积， m^3 ；

ΔV ——流体体积的增加量， m^3 ；

ρ ——流体的密度， kg/m^3 ；

$\Delta \rho$ ——流体密度的增加量， kg/m^3 。

液体的膨胀性通常以膨胀系数 α 来表示。它表示在一定压强下温度每增加 1°C (K) 时，液体体积或密度的相对变化率。即：

$$\alpha = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta T} = - \frac{1}{\rho} \frac{\Delta \rho}{\Delta T} \tag{1-5}$$

式中 α ——流体的体积膨胀系数， $1/^\circ\text{C}$ 或 $1/\text{K}$ ；

ΔT ——流体温度的增加量， $^\circ\text{C}$ 或 K 。

表 1-2 中列举了在一个标准大气压下，水在不同温度时的重度和密度。

一个大气压下水的重度及密度						表 1-2		
温度 ($^\circ\text{C}$)	重度 (kN/m^3)	密度 (kg/m^3)	温度 ($^\circ\text{C}$)	重度 (kN/m^3)	密度 (kg/m^3)	温度 ($^\circ\text{C}$)	重度 (kN/m^3)	密度 (kg/m^3)
0	9.806	999.9	15	9.799	999.1	60	9.645	983.2
1	9.806	999.9	20	9.790	998.2	65	9.617	980.6
2	9.807	1000.0	25	9.778	997.1	70	9.590	977.8
3	9.807	1000.0	30	9.755	995.7	75	9.561	974.9
4	9.807	1000.0	35	9.749	994.1	80	9.529	971.8
5	9.807	1000.0	40	9.731	992.2	85	9.500	968.7
6	9.807	1000.0	45	9.710	990.2	90	9.467	965.3
8	9.806	999.9	50	9.690	988.1	95	9.433	961.9
10	9.805	999.8	55	9.657	985.5	100	9.399	958.4

实验指出：压强每升高一个大气压，水的密度约增加 $1/20000$ 。在温度较低时 ($10 \sim 20^\circ\text{C}$)，温度每增加 1°C ，水的密度减小约为 $1.5/10000$ ；在温度较高时 ($90 \sim 100^\circ\text{C}$)，水的密度减小也只有 $7/10000$ 。这说明水的膨胀性和压缩性是很小的，一般情况下可忽略不计。其他液体的体积膨胀系数也是很小的。只有在某些特殊情况下，例如水击、热水采暖等问题时，才需要考虑水的压缩性及膨胀性。

(2) 气体的压缩性及膨胀性

气体与液体不同，具有显著的压缩性和膨胀性。压强和温度的改变对气体密度或重度影响很大。在压强不很高和温度不很低条件下，气体的压缩性和膨胀性可以用理想气体状态方程来描述，即：

$$\frac{p}{\rho} = RT \tag{1-6}$$

式中 p ——气体的绝对压强，Pa；

T ——气体的热力学温度，K；

R ——气体常数, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。对于空气, $R = 287\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; 对于其他气体, 在标准状态下, $R = \frac{8314}{n}$, 其中 n 为气体的分子量。

ρ ——气体的密度, kg/m^3 。

表 1-3 列举了在一个标准大气压下, 空气在不同温度下的重度和密度。

标准大气压下空气的重度和密度

表 1-3

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	重度 (kN/m^3)	密度 (kg/m^3)	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	重度 (kN/m^3)	密度 (kg/m^3)
0	12.70	1.293	40	11.05	1.128
5	12.47	1.270	50	10.72	1.093
10	12.24	1.248	60	10.40	1.060
15	12.02	1.226	70	10.10	1.029
20	11.80	1.205	80	9.81	1.000
25	11.62	1.185	90	9.55	0.973
30	11.43	1.165	100	9.30	0.947
35	11.23	1.146			

(3) 流体的黏滞性

流体在流动时, 其内部各质点之间会出现相对运动, 会产生切向的内摩擦力以抵抗其相对运动, 流体的这种性质称为黏滞性。产生的内摩擦力称为黏滞力。

图 1-1 为流体在圆管中流动时的管内流速分布图。

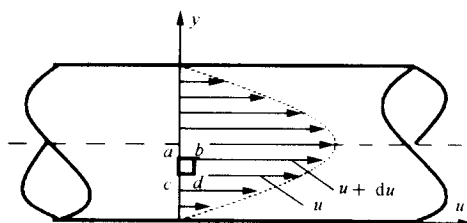


图 1-1 流体在圆管中的流速分布图

当流体在管中缓慢流动时, 紧贴管壁的流体质点, 粘附在管壁上, 流速为零。而和它相邻的一层流体, 在惯性的作用下具有保持其原有运动的趋势。因为实际流体都有黏滞性, 所以当相邻两层流体之间出现相对运动时, 它们之间会产生内摩擦力, 阻碍流体的运动。作用在两个流体层接触面上的内摩擦力总是成对出现的, 即大小相等而方向相反, 分别作用在相对运动的流层上。位于管轴上的流体质点, 离管壁的距离最远, 受管壁的影响最小, 因而流速最大。

由此可见, 流体沿固体壁面运动时所产生的流动阻力, 主要原因不是流体与固体壁面之间的摩擦力, 而是流体内部各流层之间产生的内摩擦力, 即黏滞力。固体壁面的存在只是引起流动阻力的外部条件, 流体的黏滞性才是产生流动阻力的内在原因。如果流体没有黏滞性, 流动时就不会出现阻力, 也就不会产生能量损失。

牛顿经过大量实验证明, 对于大多数流体, 内摩擦力 T 的大小: 与两流层间的速度 du 成正比, 与两流层间距离 dy 成反比; 与流层的接触面积 A 的大小成正比; 与流体种类有关; 与流层接触面上的压力无关。

内摩擦力的数学表达形式可写作:

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-7)$$

这个关系称为牛顿内摩擦定律。

单位面积上的内摩擦力，称为切应力，以 τ 表示。则：

$$\tau = \frac{T}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-8)$$

式中 $\frac{du}{dy}$ ——速度梯度，表示速度沿垂直于速度方向 y 的变化率，单位为 s^{-1} 。

τ ——切应力，常用的单位为 N/m^2 ，简称 Pa。切应力不仅有大小，还有方向。流体内产生的切应力，是阻碍流体相对运动的，但它不能从根本上制止流动的发生，流体的流动性，不因有内摩擦力的存在而消失。当流体静止时，不会产生切应力，但流体仍具有黏滞性。

μ ——动力黏滞系数，又称动力黏度。是与流体种类有关的比例系数。单位是 $N \cdot s/m^2$ ，常用符号 $Pa \cdot s$ 表示。不同的流体有不同的 μ 值， μ 值越大，表明其黏滞性愈强

水和空气（一个标准大气压下）的黏度

表 1-4

温 度 ℃	水		温 度 (℃)	空 气	
	$\mu \times 10^3 \text{ (Pa} \cdot \text{s)}$	$\nu \times 10^6 \text{ (m}^2/\text{s)}$		$\mu \times 10^3 \text{ (Pa} \cdot \text{s)}$	$\nu \times 10^6 \text{ (m}^2/\text{s)}$
0	1.792	1.792	0	0.0172	13.7
5	1.519	1.519	10	0.0178	14.7
10	1.308	1.308	20	0.0183	15.7
15	1.140	1.140	30	0.0187	16.6
20	1.005	1.007	40	0.0192	17.6
25	0.894	0.897	50	0.0196	18.6
30	0.801	0.804	60	0.0201	19.6
35	0.723	0.727	70	0.0204	20.5
40	0.656	0.661	80	0.0210	21.7
45	0.599	0.605	90	0.0216	22.9
50	0.549	0.556	100	0.0218	23.6
60	0.469	0.477	120	0.0228	26.2
70	0.406	0.415	140	0.0236	28.5
80	0.357	0.367	160	0.0242	30.6
90	0.317	0.328	180	0.0251	33.2
100	0.284	0.296	200	0.0259	35.8
			250	0.0280	42.8
			300	0.0298	49.9

在分析流体的运动规律时，动力黏度 μ 和密度 ρ 经常同时出现，流体力学中常把它们组成一个量，用 ν 来表示，称为运动黏度。即：

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-9)$$

ν 常用单位为 m^2/s 。

表 1-4 列出了水和空气在一个标准大气压，不同温度下的黏度。

从表 1-4 可以看出：水和空气的黏度随温度变化的规律是不同的，水的黏度随温度升高而减小，空气的黏度随温度升高而增大。这是因为黏滞性是分子间的吸引力和分子不规则的热运动产生的动量交换共同作用的结果。温度升高时，分子间吸引力降低，动量增

大；温度降低时，分子间吸引力增大，动量减小。对于液体，分子间的吸引力是决定性的因素，所以液体的黏度随温度升高而减小；对于气体，分子间的热运动产生动量交换是决定性的因素，所以气体的黏度随温度升高而增大。

【例 1-1】一块长 100cm、宽 40cm 的平板在另一块平板上水平滑动。两板间的间隙是 0.5mm，用密度为 918kg/m^3 、运动黏度为 $0.893 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ 的润滑油充满此间隙，如果以 40cm/s 的稳定速度拖动上面的平板，求需要的动力为多少？

【分析】需要的动力是克服运动时润滑油的黏滞力，根据牛顿内摩擦定律，黏滞力 $T = \mu A \frac{du}{dy}$ 来计算。

【解】由于木板与木板之间间隙很小，油层厚度很薄，可以认为两板间速度按直线分布：

$$\frac{du}{dy} = \frac{0.4}{0.0005} = 800\text{s}^{-1}$$

动力黏滞系数 $\mu = \nu\rho = 0.893 \times 10^{-4} \times 918 = 0.082 \text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$

需要的动力为

$$T = \mu A \frac{du}{dy} = 0.082 \times 1 \times 0.4 \times 800 = 26.24 \text{N}$$

1.3 作用在流体上的力

流体的物理性质是改变流体运动状态的内因，作用于流体上的外力是改变流体运动状态的外因。

作用在流体上的力分为质量力和表面力。

1.3.1 质量力

质量力是作用在流体的每一个质点上，与流体的质量成正比的力，如重力、离心力及一切由于加速度而产生的惯性力。质量力的合力作用于流体的质量中心。在匀质流体中，质量力与受作用流体的体积成比例，所以又叫体积力。

单位质量力的单位为 m/s^2 ，它与加速度的单位相同。

1.3.2 表面力

表面力是作用在被研究流体表面上，且与作用表面的面积成正比的力。它可以是作用在流体边界面上的外力，如大气对液面的压力、活塞作用在流体上的压力、容器壁面的反作用力等；也可以是流体内部一部分流体作用于另一部分流体接触面上的内力，它们大小相等、方向相反，是相互抵消的。我们在应用流体力学分析问题，常常从流体内部取出一个分离体来研究其受力状态，使流体的内力变成作用在分离体表面上的外力。

课题 2 流体静力学基础

当流体处于静止或相对静止时，各质点之间不产生相对运动，流体的黏滞性不起作用，而且静止流体也不能承受拉力。因此流体静止时需要考虑的作用力就只有压力和质量力。通常质量力是已知的，所以流体静力学主要是研究流体在静止或相对静止状态下的压强分布规律及其在工程中的应用。

2.1 流体静压强及其特性

2.1.1 流体静压强的定义和单位

静止流体不能承受切应力，也不能承受拉力，所以静止流体只能承受垂直于受压面（也称作用面）的压力。作用在受压面面积上压力的总和称为流体的总压力或压力。作用在单位面积上的压力称为流体的压强。

常用的压强计量单位有三种：

(1) 用单位面积上的力来表示压强的大小。在国际单位制中用 N/m^2 ，即 Pa（帕），也可用 kPa 或 MPa（兆帕， $1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$ ）。在工程单位制中用 kgf/m^2 或 kgf/cm^2 表示。

(2) 用测压管内的液柱高度来表示。常用的有 mH_2O （米水柱）、 mmH_2O （毫米水柱）和 mmHg （毫米汞柱）；

(3) 用大气压强的倍数来表示。国际上常用标准大气压（atm），工程上一般用工程大气压（at）。

表 1-5 给出了各种压强单位的换算关系。

各种压强单位换算表

表 1-5

帕, Pa N/m^2 (牛顿/米 ²)	工程大气压 kgf/cm^2 或 at (公斤力/厘米 ²)	标准大气压 atm (760mmHg)	毫米汞柱 mmHg	毫米水柱 mmH_2O
1	1.0197×10^{-5}	0.9869×10^{-5}	0.7510×10^{-2}	0.10197
0.9807×10^5	1	0.9678	735.56	1.00003×10^4
1.0133×10^5	1.03323	1	760.00	1.0333×10^4
9.806	0.9697×10^{-4}	0.9678×10^{-4}	7.3554×10^{-2}	1
1.3332×10^2	1.3595×10^{-3}	1.3158×10^{-3}	1	13.5955

2.1.2 压强的两种计量基准

工程实践中，静压强的计算可采用两种不同的计量基准（即计算起点）来计算，即绝对压强和相对压强。

(1) 绝对压强与相对压强

以没有气体分子存在的绝对真空为零点起算的压强称为绝对压强，常以 p 表示。

以同高程的当地大气压强为零点起算的压强称为相对压强，常以 p_x 表示。

地球表面海拔高程不同的地方，其大气压强也有差异，在工程上为计算方便，一般取大气压强为 98.07kN/m^2 ，称为一个工程大气压（at），常以 B 表示。

绝对压强与相对压强之间差一个大气压强，即：

$$p_x = p - B \quad (1-10)$$

如果将一个压力表放在大气中，指针读数为零，则此压力表所测读的压强为相对压强，也称为表压力。

(2) 真空压强（或称真空度）

当流体中某点的绝对压强 p 小于当地大气压强 B 时，称该点处于真空状态。其真空的程度用真空压强表示，符号为 H 。

显然,绝对压强只能是正值,而相对压强可正可负。当相对压强为正值时,称为正压;为负值时,称为负压。出现负压的状态即为真空状态。所谓某点的真空压强是指该点的绝对压强值低于大气压强的部分,即:

$$H = B - p \quad (1-11)$$

$$\text{或} \quad H = -p_x \quad (1-12)$$

为了正确区分上述三种压强,现将它们的相互关系表示于图 1-2 中。

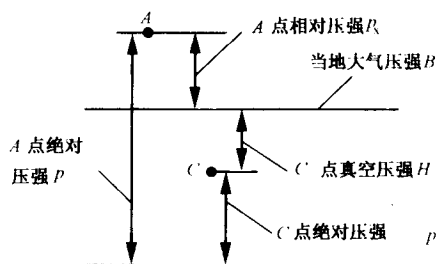


图 1-2 压强的图示

2.1.3 流体静压强的特性

(1) 流体静压强的方向垂直指向作用面。

(2) 作用于流体中任一点静压强的大小在各方向上均相等,与作用面的方向无关。

2.1.4 自由表面和表面压强

自由表面是指液体与它上面气体的交界面,如水箱的水面即为自由表面。液体在重力作用下的自由表面一般为水平面。

自由表面上的气体压强称为表面压强,一般用 p_0 表示。如果自由表面上作用的是大气,则大气的质量对地面物体或对自由表面产生的压强即大气压强,此时 $p_0 = B$ 。

2.2 流体静压强的基本方程及分布规律

2.2.1 液体静压强的基本方程

图 1-3 为重力作用下的静止液体。在液面下深度为 h 处任选一点 A , 围绕 A 点取一水平的微小面积 dA , 再以 dA 为底, 取一垂直的棱柱体作为隔离体, 柱体顶面与自由液面重合。下面分析作用在液柱上的力。

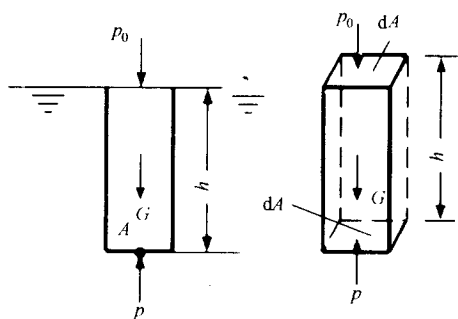


图 1-3 液体内微小液柱的平衡

(1) 表面力

1) 作用在液柱顶面 dA 上的压力为 $p_0 dA$, 其方向垂直向下。其中 p_0 为作用在液柱上表面的压强。

2) 作用在液柱底面 dA 上的压力为 $p dA$, 其方向垂直向上。其中 p 为作用在液柱下表面的压强。

(2) 质量力

作用在液柱上的质量力只有重力, 其值为 $\gamma h dA$, 方向垂直向下。

因液柱处于静止状态, 根据力平衡原理, 沿垂直方向所有外力的合力等于零, 即:

$$p dA - p_0 dA - \gamma h dA = 0$$

$$p = p_0 + \gamma h \quad (1-13)$$

式中 p ——液体中某点的压强, Pa;

p_0 ——液体表面压强, Pa;

γ ——液体的重度, N/m^3 ;

h ——某点在液面下的深度, m 。

式 (1-13) 为重力作用下液体静压强的基本方程。它可说明如下几个问题:

1) 静止液体中任一点的压强 p 是液面压强 p_0 (边界条件) 和重力 (质量力) 产生的压强 γh 两者之和。当重度 γ 一定时, 静压强 p 随水深 h 呈线性规律变化, 压强的大小与容器形状无关。

2) 如果液面压强 p_0 增减 Δp_0 , 静止液体内部各点的压强将同时增减 Δp_0 值, 即液面压强的任何变化, 将等值地传到液体内部各点, 这就是著名的帕斯卡定律。工程上使用的水压机、水力起重机, 液压传动、气动门等简单的水力机械, 就是根据帕斯卡定律工作的。

3) 在连通的同一种类静止液体中, 液面下深度相等的水平面上各点的静压强相等, 凡由静压强相等的点所组成的面, 称为等压面。因而在重力作用下的静止液体中, 水平面必然是等压面。

静止液体内水平面是等压面必须同时满足静止、同种、连续三个条件。在图 1-4 (a) 中, 位于同一水平面上的 1、2、3、4 各点满足条件, 各点压强相等, 通过该四点的水平面为等压面; 图 1-4 (b) 中, 因连通器被阀门隔断, 液体的连续性受到破坏, 故同一水平面上的 5、6 两点静压强并不相等, 过 5、6 两点的水平面不是等压面; 图 1-4 (c) 为盛有两种不同液体的连通器, 通过油和水分界面的水平面为等压面, 在该水平面上的 7、8 两点压强相等。而穿过两种不同液体的水平面不是等压面, a 、 b 两点压强不等; 图 1-4 (d) 中, c 和 d 两点虽属静止、同种液体, 但不连续, 所以同在一个水平面上的 c 、 d 两点压强不相等, 通过这二点的水平面不是等压面。

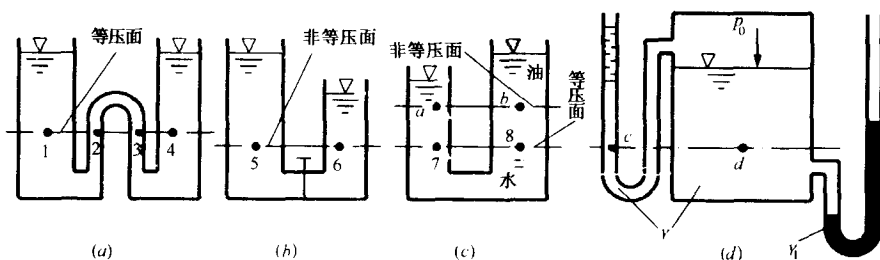


图 1-4 等压面分析

4) 重力作用下液体静压强的基本方程, 对于不可压缩气体 ($\gamma = C$) 仍然适用。

由于气体重度 γ 很小, 在高差不大的情况下, 气柱产生的压强值很小, 因而可以忽略 γh 的影响, 则式 (1-13) 简化为:

$$p = p_0 \quad (1-14)$$

表示空间各点气体压强相等, 例如液体容器、测压管、锅炉等上部的气体空间, 我们就认为各点的压强是相等的。

5) 当液体自由表面敞开于大气之中时, 自由表面上的气体压强 $p_0 = B$, 则静止液体内部任意点的相对压强为:

$$p_x = B + \gamma h - B = \gamma h \quad (1-15)$$

一般工业设备或构筑物处于当地大气压强的作用下,如采用绝对压强计量基准,需考虑外界大气压强的作用,而这个作用往往是相互抵消的;如采用相对压强计量基准,计算会比较方便。所以工程上一般多采用相对压强计量基准。以后讨论所提到的压强,若不加特殊说明,均指相对压强。只有涉及可压缩流体时,因要与热力学方程联立求解,才采用绝对压强计量基准。

2.2.2 液体静压强的分布规律

根据液体静压强基本方程 $p = p_0 + \gamma h$ 和静压强的特性,将作用在受压面上静压强的大小、方向及分布情况用一图形表示,这个几何图形就称为液体静压强的分布图。其绘制规则是:

- (1) 按照一定比例,用一定长度的线段来代表静压强的大小。
- (2) 用箭头标出静压强的方向,并与受压面垂直。

现以图 1-5 中垂直面 AB 左侧为例绘制静压强分布图。

根据压强 p 和水深 h 呈线性变化的规律,只要定出 AB 面上 A 与 B 两个端点的压强大小,并用一定比例的线段画在相应的点处,连接两线段的端点,即得到受压面 AB 的静压强分布图 $ABED$ 。

如果液面压强 p_0 等于当地大气压 B 时,因 B 对壁面 AB 的左、右两侧都有作用,大小相等方向相反而抵消,对受压壁面是不产生力学效果的。所以在工程计算中,只考虑相对压强的作用,即水深所造成的压强 γh 的力学效果,压强分布图只考虑三角图形 ABC 的压强分布。

图 1-6 是根据液体静压强基本方程和静压强特性,在斜面、折面、垂直面及曲面上绘制的静压强分布图。

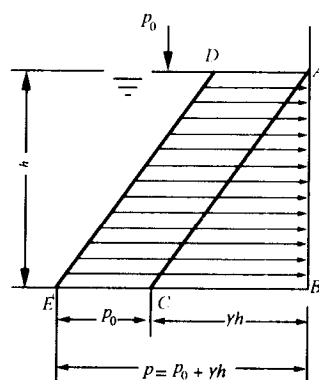


图 1-5 静压强分布图的画法

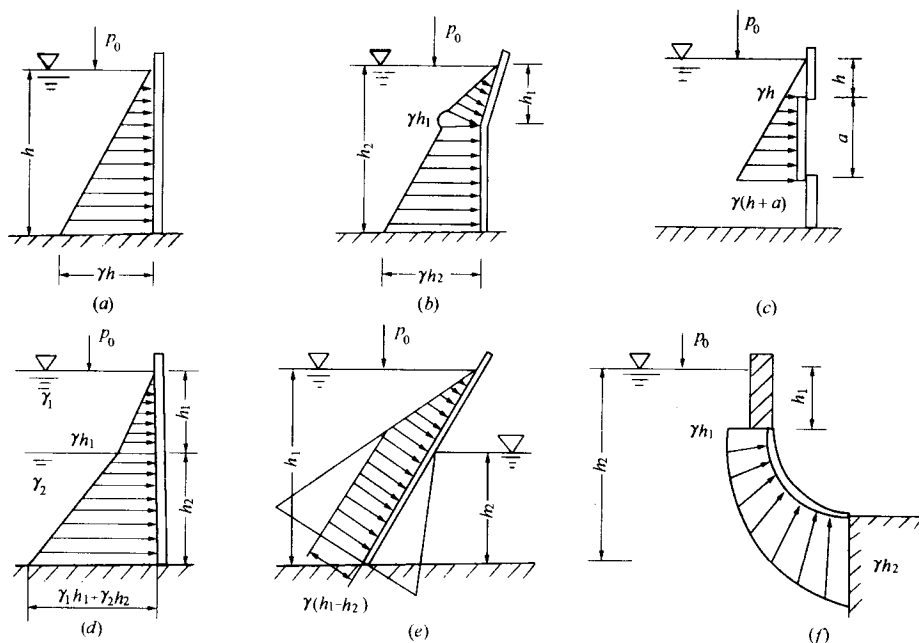


图 1-6 静压强分布图

【例 1-2】有一水池，如图 1-7 所示。已知液面压强 $p_0 = 98.10\text{kPa}$ ， $h_1 = 4\text{m}$ ， $h_2 = 2\text{m}$ ，求作用在池中 A、B、C、D 各点的静压强及其作用方向。

【分析】液体静压强方程 $p = p_0 + \gamma h$ 来计算。因 A、B、C 在同一水平面上，这三点的静压强相等。

【解】 $p_A = p_B = p_C = p = p_0 + \gamma h_1 = 98.10 + 9.81 \times 4 = 137.34\text{kPa}$

$p_D = p_0 + \gamma (h_1 + h_2) = 98.10 + 9.81 \times (4 + 2) = 156.96\text{kPa}$

静压强的方向应根据静压强的特性分别确定，如图 1-7 中各点箭头所示的方向。

2.2.3 液体静压强基本方程的另一种表达形式

如图 1-8 所示，设容器内液体表面的压强为 p_0 ，液体中 A、B 两点距液面的深度分别为 h_A 和 h_B ，距任选基准面 0-0 的高度为 z_A 和 z_B ，自由液面上任一点距基准面 0-0 的高度为 z_0 ，则 A、B 两点的静压强分别为：

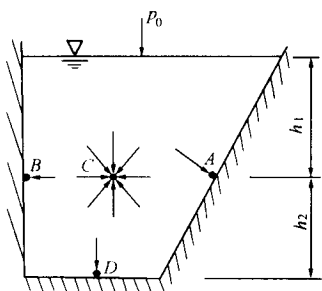


图 1-7 例 1-2 图

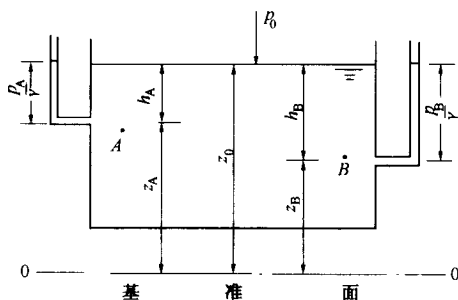


图 1-8 静压强基本方程另一种形式

$$p_A = p_0 + \gamma h_A = p_0 + \gamma (z_0 - z_A)$$

$$p_B = p_0 + \gamma h_B = p_0 + \gamma (z_0 - z_B)$$

上式除以重度 γ ，整理得：

$$z_A + \frac{p_A}{\gamma} = z_0 + \frac{p_0}{\gamma}$$

$$z_B + \frac{p_B}{\gamma} = z_0 + \frac{p_0}{\gamma}$$

两式联立解得：

$$z_A + \frac{p_A}{\gamma} = z_B + \frac{p_B}{\gamma} = z_0 + \frac{p_0}{\gamma}$$

液体中 A、B 两点是任意选定的，故可将上述关系式推广到整个液体，得出具有普遍意义的规律。即：

$$z + \frac{p}{\gamma} = C \text{ (常数)} \quad (1-16)$$

方程 (1-16) 是液体静压强基本方程的另一表达形式。它表示在同一种静止液体中，任意一点的 $\left(z + \frac{p}{\gamma}\right)$ 总是一个常数。方程 (1-16) 的几何意义与物理意义如下：

(1) 几何意义

z ——表示静止液体中某一点相对于某一基准面的位置高度，称位置水头（或